

## LAIKO IR APLINKOS ĮTAKOS GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ MECHANINĖMS SAVYBĖMS TYRIMAI ARDANČIAISIAIS IR NEARDANČIAISIAIS METODAIS

Vaida Lendraitienė, Ina Pundienė

Klaipėdos universitetas, Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

### Įvadas

Projektuojant pastatą ir parenkant gelžbetoninių konstrukcijų betono sudėtį, itin svarbu suprojektuoti tinkamą betoną, kad konstrukcijos tarnautų kuo ilgiau. Ypač tai aktualu, kai konstrukcijos eksploatuojamos agresyvioje aplinkoje ir įprastas betonas ilgai neišsilaikys dėl aplinkos poveikio gali degraduoti ir prarasti laikomąją galią. Cheminiai junginiai, kontaktuodami su konstrukcija per orą ar per skysčius, aukšta arba žema aplinkos temperatūra ir didelė drėgmė sukelia betono koroziją. Yra atlikta daugybė tyrimų, kur nagrinėjamas agresyvios aplinkos poveikis betonui ir nustatyta, kad ilgalaikis agresyvios aplinkos poveikis sukelia fizine ir chemine betono koroziją, ir agresyvioje aplinkoje eksploatuojamų gelžbetoninių konstrukcijų betono stipris bei elastingumo modulis mažėja. Šie pakitimai negrįžtami ir pašalinus agresyvią aplinką, betono savybės neatsistato.

Straipsnyje nagrinėjama pramoninio pastato konstrukcijų būklė ir agresyvios aplinkos poveikis konstrukcijoms. Taip pat siekiama parinkti labiausiai tinkamą cemento rūšį, eksploatuojant konstrukcijas agresyviomis sąlygomis, bei mineralinio priedo įtaką betono savybėms.

Pastatas, kurio konstrukcijų tyrimas aptariamas straipsnyje, yra surenkamų gelžbetoninių konstrukcijų. Pastatas pastatytas 1972 metais, pagal "Latgiproprom" projektą Nr. 1524-7. Pastato konstrukcinė schema - 2 aukštų ir 1 navos 24 m pločio ir 23 m aukščio, spragotinio tipo surenkamų g/b kolonų su ant jų besiremiančiomis surenkamomis g/b santvaromis. Stogo denginys - briaunotų surenkamų plokščių. I aukšto perdenginys - ant pirmo aukšto kolonų, išdėstytų 6x6 m žingsniu remiami surenkami arba monolitiniai rygeliai bei surenkamos briaunuotos arba monolitinės sijinės plokštės. Pastato plotas 9600m<sup>2</sup>.

Pastate vyksta nenutraukiama gamyba. Dėl pastate vykstančių technologinių procesų, atskirose pastato zonose laikosi aukšta temperatūra (40-60<sup>0</sup>C). Šiluma įrenginiams tiekama iš greta esančios katilinės, garo pavidalu. Tiekiamo garo temperatūra 180<sup>0</sup>C. Taip pat gamybos proceso metu susidaro didelis kiekis nuotekų (apie 5000m<sup>3</sup> per parą), kurių temperatūra - 38<sup>0</sup>C. Dalis nuotekų išleidžiamos per atviro tipo gamybinius latakus, įrengtus pastato pirmo aukšto grindyse. Bendras latakų ilgis pastate – apie 600m, todėl susidaro didelis nuotekų garavimo plotas. Dėl vykstančių anaerobinių procesų, nuotekose susidaro įvairių cheminių junginių (sieros vandenilis, amoniako rūgštis, formaldehidai, acto rūgštis, etanolis, chloras) ir su garais šie cheminiai junginiai patenka į aplinką.

**Raktiniai žodžiai:** betono ilgaamžiškumas; gelžbetonio konstrukcijų savybės, eksploatuojant agresyvioje aplinkoje; betono bendrynių, kietėjusių aukštoje, temperatūroje savybės; betono kietėjimas agresyvioje aplinkoje; betono bandiniai su mikrosilika; skirtingos cemento rūšys; pramoninio pastato gelžbetoninės konstrukcijos; betono stipris; ultragarsinio impulso greičio metodo taikymas gelžbetoninių konstrukcijų tyrimui.

### Tyrimo tikslai

Tiriamasis darbas buvo vykdomas dviem kryptimis, norint įvertinti tarnaujančio betono būklę ir parinkti cementą, labiausiai atsparų agresyvios aplinkos poveikiui.

Pasiekti pirmajam tikslui pirmiausia iš pastato konstrukcijų išgręžti kernai (6 vienetai). Kernai imti iš dviejų gretimų zonų. Vienoje zonoje kernų ėmimo metu užfiksuota 47,6<sup>0</sup>C ir 23% drėgmė, kitoje zonoje temperatūra - 34,8<sup>0</sup>C ir didesnė drėgmė - 77%. Kerno bandiniai buvo tiriami ultragarsu bei sugniuždyti mechaniškai, Kernų ėmimo vietose sklerometru nustatytas atšokimo rodiklis ir apskaičiuotas tikėtinas betono stipris.

Pasiekti antrajam tikslui - buvo pagaminti betoninių kubelių bandiniai, naudojant skirtingo tipo cementus ir mineralinius priedus. Pusė bandinių 180 dienų buvo laikomi normaliomis sąlygomis, o kita pusė patalpinta pramonės paskirties pastate, kur ore fiksuojami cheminiai junginiai, temperatūra svyruoja nuo 30 iki 45 <sup>0</sup>C, drėgmė iki 75%. Po 4 ir 6 mėnesių bandiniams buvo atliktas ultragarsinio impulso greičio tyrimas, o po 6 mėnesių buvo atliktas mechaninio gniuždymo bandymas.

Tiriamajam darbui suformuoti šie tikslai:

1. Atlikti kernų ir betono kubelių mechaninių savybių nustatymo bandymus ir atlikti rezultatų analizę;
2. Pateikti rekomendacijas, kaip prailginti konstrukcijų eksploatavimo agresyvioje aplinkoje laiką.

### Konstrukcijų kernų tyrimai

Kerno bandinys iš konstrukcinio elemento išgautas naudojant gręžimo įrankį. Gręžimo įrenginys tvirtai pritvirtinamas prie betono elemento. Gręžtuvas tepamas atvėsintu vandeniu. Kernai buvo gręžti iš surenkamų kolonų, kurios buvo sumontuotos gamyklos statybos metu. Kolonos pagamintos pagal seriją KЭ-01-52, markė КДII-3. Naudojamas betonas buvo M300 markės. Buvo išgręžti 6 kernai, 100 mm diametro. Bandiniai įvertinti vizualiai. 6 bandinyje matoma skersinės ir išilginės armatūros strypai, todėl gniuždymo bandymui šis bandinys netinkamas. 1 bandinyje paviršiuje buvo skersinis 8 mm diametro armatūros strypas. Armatūros korozija šiame bandinyje nepasireiškė. 3 bandinyje cilindro šone matoma dalis skersine kryptimi einančios armatūros strypo, kurio diametras 24 mm, armatūros strypas nepažeistas korozijos. 4 bandinyje yra 8 mm diametro skersinis armatūros strypas, 15 mm nuo bandinio krašto, buvo priimtas sprendimas bandinį nupjauti, kad būtų galima gniuždyti. Matomas armatūros strypas paveikta korozijos. Bandinių fizinės charakteristikos pateikiamos 1 lentelėje.

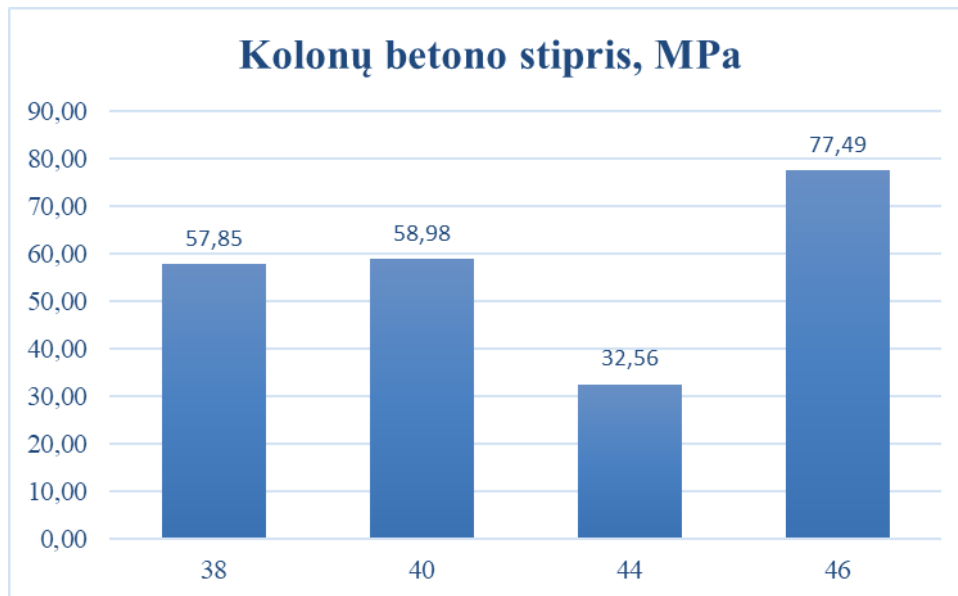
1 lentelė. Bandinių fizinės savybės

Kerno numeris	Diametras	Aukštis	Masė	Tūrinis svoris,
	mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>
1	100	85	1553	2327,463
2	100	80	1325	2109,873
3	100	105	1884	2285,714
4	100	67	1210	2300,599
5	100	110	1653	1914,302

Įvertinus fizinės savybes matoma, kad 5 bandinio tūrinis svoris skiriasi 13% nuo vidutinio bandinių tūrinio svorio - tai rodo didesnę bandinio porėtumą.

Bandinių ėmimo vietose sklerometru buvo pamatuotas atšokimo rodiklis. Bandymams buvo naudojamas Silver Schmidt 8200 Tyle L prietaisas. Kiekvienai kolonai atšokimo

rodiklis buvo matuotas 10 kartų. Matavimo duomenys pateikti 1 paveikslėlyje. Matavimai parodė stiprų ir labai stiprų konstrukcijų betoną.



1 Pav. Sklerometro bandymo duomenys.

Siekiant įvertinti betono struktūrą, vientisumą ir apytikriai nustatyti mechanines savybes, buvo atliktas ultragarsinio impulso greičio (UPV – Ultrasonic Pulse Velocity) bandymas. Tai neardomasis tyrimo metodas, pagrįstas ultragarso bangos sklidimo per medžiagą greičio matavimu.

Bandymams naudotas prietaisas „Pundit Lab“, kuris leidžia nustatyti ultragarso bangos sklidimo laiką tarp dviejų daviklių. Vienas daviklis generuoja signalą, o kitas jį priima. Pagal išmatuotą laiką ir žinomą atstumą tarp daviklių apskaičiuojamas bangos sklidimo greitis:

$$V = \frac{L}{t} \quad [1]$$

čia

V – ultragarso bangos sklidimo greitis;

L- ultragarso bangos sklidimo laikas;

T – sluoksnio storis.

Tyrimas buvo atliekamas Vilnius Tech universiteto laboratorijoje.

Kernai Nr. 1 ir 3 buvo išpjauti iš konstrukcijų, eksploatuojamų drėgnesnėje aplinkoje, o kernai Nr. 2, 4 ir 5 – iš sausesnėje aplinkoje eksploatuojamų konstrukcijų.

Pagal gautus ultragarso duomenis galima daryti išvadas, kad kernų rezultatai pasižymi didele sklaida, kas rodo nevienalytę struktūrą, galimus lokalius defektus ar eksploatacinio poveikio įtaką. Kai kuriuose bandiniuose nustatyti labai dideli ultragarso trukmė (pvz., >40–60 μs), kas rodo galimus vidinius įtrūkimus, padidėjusį poringumą, stipriai sumažėjusį vientisumą. Dalis kernų pasižymi geresniais rodikliais, tačiau bendras rezultatas rodo, kad realios konstrukcijos betono kokybė yra prasta.

Ultragarsinio impulso greičio tyrimo duomenys pateikti 2 lentelėje.

**2 lentelė.** Ultragarso impulso greičio tyrimo duomenys

Bandinio Nr.	Diametras, cm	Aukštis, cm	Masė, g	Ultragarso parodymai (sklidimo laikas ir greitis)			
				Skersine kryptimi		Išilgine kryptimi	
				d	h	m	μs
1	10	8	1583	25,1	3187	22,4	3571
				22,2	3603		
2	10	11,3	2030	40,5	2469	47	2404
				38,9	2570		
3	10	9,8	1879	27,2	3676	32,5	3015
				27,4	3649		
				31,8	3144		
4	10	11	2249	24,2	4132	37,9	2902
				26	3846		
5	10	10	1649	43	2325	44,9	2227
6	10	11	2000	29,5	3729	39,1	2813
				26,4	4166		

Gniuždymo bandymai buvo atliekami Klaipėdos universiteto Jūrų technologijų ir gamtos mokslų fakultete esančioje laboratorijoje, presu „Controls“. Apkrova buvo tolygiai didinama po 0,5 MPa/s iki bandinių sugniuždymo.

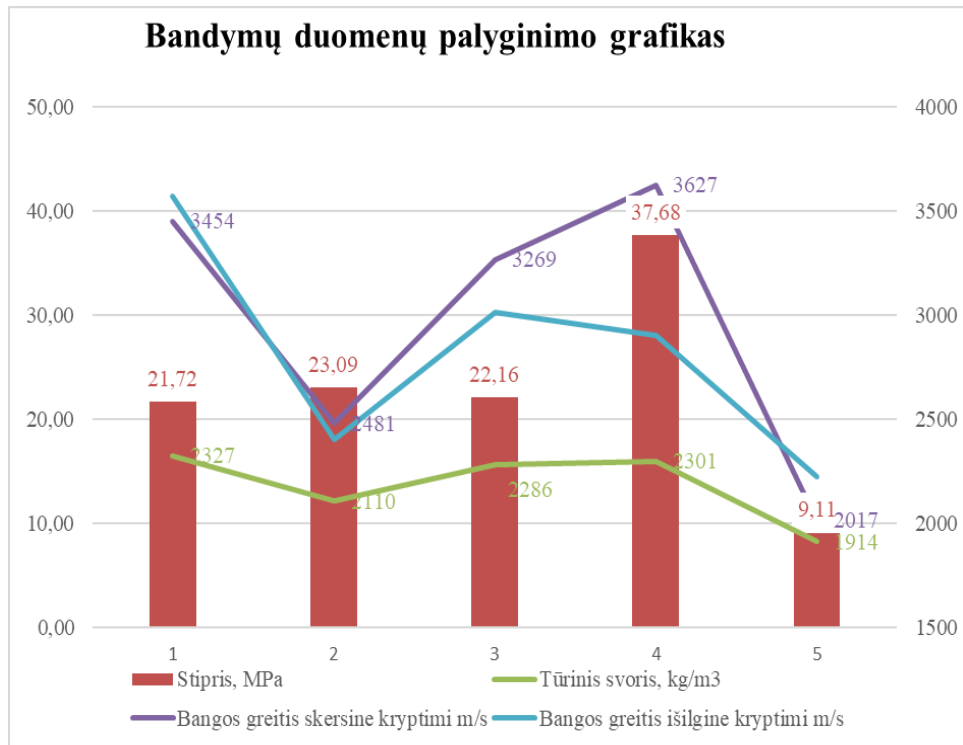
Gniuždant bandinius, irimo metu susiformavo vertikalūs plyšiai. Matoma, kad betonas buvo pagamintas naudojant stambų granitinį užpildą. Pamatuota maksimali užpildo frakcija – 40 mm.

Bandinių gniuždymo stipris buvo apskaičiuotas pagal didžiausios gniuždymo jėgos ir skerspjuvio ploto santykį. Papildomai įtraukta bandinių aukščio ir skersmens santykio  $h/d$  įtaka. Nustatyta, kad koreguotas betono stipris kinta nuo 9,11 MPa iki 37,68 MPa. Didžioji dalis bandinių parodė 21–23 MPa stiprį, todėl ši reikšmių sritis laikytina reprezentatyviausia bendrai betono būklei. Tuo tarpu atskirų kernų rezultatų išsiskyrimas rodo betono nevienalytiškumą bei galimą eksploatacinio ar aplinkos poveikio sukeltą savybių degradaciją. Ultragarso bandymų rezultatai iš esmės patvirtina gniuždymo bandymų tendencijas: didesni bangos sklidimo laikai nustatyti silpnesnio betono zonose, o mažesni – tankesnio ir stipresnio betono vietose. Mechaninio gniuždymo bandymo rezultatai pateikiami 3 lentelėje.

**3 lentelė.** Kernų gniuždymo bandymo rezultatai

Bandinio numeris	Kolono s numeris	Diametras	Aukštis	Masė	Gniuždymo jėga	Apskaičiuotas stipris	Koregavimo koeficientas dėl kerno aukščio ir diametro santykio	Perskaičiuotas stipris
		mm	mm	g	kN	MPa		MPa
1	40	100	85	1553	206,0	26,229	0,828	21,72
2	44	100	80	1325	222,8	28,368	0,814	23,09
3	38	100	105	1884	198,0	25,210	0,879	22,16
4	46	100	67	1210	377,5	48,065	0,784	37,68
5	44	100	110	1653	80,6	10,262	0,888	9,11

Visi bandymų duomenys pateikiami grafike, 2 paveikslėlyje.



2 pav. Kernų bandymo duomenų palyginimo grafikas.

Apskaičiuotas koreliacijos koeficientas, siekiant nustatyti ryšį tarp gautų duomenų:

- tarp bandinių stiprio ir tūrinio svorio  $R=0,73$ ,
- tarp bandinių stiprio ir vidutinio ultragarso bangos sklidimo greičio skersine  $R=0,79$  (išilgine kryptimi  $R=0,38$ ),
- tarp ultragarso bangos sklidimo greičio skersine kryptimi ir tūrinio svorio  $R=0,97$ ,
- tarp ultragarso bangos sklidimo greičio išilgine kryptimi ir tūrinio svorio  $R=0,87$ .

Matome, kad koreliacijos koeficientas tarp vidutinio ultragarso bangos sklidimo greičio skersine kryptimi ir tūrinio svorio itin stiprus.

### Betono kubelių bandymų tyrimai

Siekiant nustatyti, kokia betono sudėtis palankesnė agresyvios aplinkos poveikiui, buvo pagaminti betono kubelių bandiniai, naudojant skirtingas cemento rūšis.

Buvo suprojektuotas C25/30 klasės betonas ir bandiniams naudojami 5 rūšių cementai, taip gauti 5 rūšių betonai. 6 rūšies betonas gautas 8 procentus cemento CEMI kiekio pakeitus mikrosilika.

Duomenys betono projektavimui:

- Gniuždymo stiprio klasė – C25/30;
- Konsistencijos (slankumo) klasė – S4;
- Aplinkos poveikių klasė – XC4;
- Oro kiekis – 2,0 %;
- Cemento kiekis – ne mažiau 290 kg/m<sup>3</sup>;
- V/C santykis – ne didesnis nei 0,60;
- Granulometrijos ribos – 16 mm.

Betono sudėties skaičiavimai atlikti vadovaujantis LST 1974:2012 standarte pateikta skaičiavimo metodika. Gauta betono sudėtis pateikiama 4 lentelėje.

4 lentelė. Betono sudėtis

	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Kiekis 1m <sup>3</sup> betono mišinio
Stambiojo užpildo (skaldos) kiekis	S <sub>t</sub>	kg	780
Smulkiojo užpildo (smėlio) kiekis	S <sub>m</sub>	kg	935
Cemento kiekis	C	kg	342
Vandens kiekis	V <sub>pl</sub>	l	213
Betono mišinio tankis	q <sub>bet.miš.</sub>	kg/m <sup>3</sup>	2262

Betono kubelių gamybai buvo naudotos šios medžiagos:

1. Cementas. Panaudoto cemento rūšys ir gamintojai pateikiami 5 lentelėje

5 lentelė. Bandiniams naudotos cemento rūšys

Eilės Nr.	Cemento pavadinimas	Cemento rūšis	Tipinis smulkumas cm <sup>2</sup> /g	Vidutinis dalelių dydis, μm	Sudėtis
1	Schwenk	CEM II/A-LL 42,5 R	3800-4500	~12-18	~80–94 % portlandcemenčio klinkerio, 6–20 % kalkakmenio (CaCO <sub>3</sub> ), gipsas. Klinkeryje vyrauja alitas (C <sub>3</sub> S), belitas (C <sub>2</sub> S), mažiau C <sub>3</sub> A ir C <sub>4</sub> AF.
2	Kryvyirig	CEM II/A-S 32,5 N	3000-3800	~18-30	Portlandcemenčio klinkeris + granuliuotas aukštakrosnių šlakas (~6–20 %). Mineralinė sudėtis: C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S, C <sub>3</sub> A, C <sub>4</sub> AF bei amorfinė šlako stiklinė fazė, turtinga CaO–SiO <sub>2</sub> –Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –MgO
3	Rocket M-800	CEM II/A-LL 42,5 N	4000-5000	~8-15	Portlandcemenčio klinkeris, kalkakmenio priedas, gipsas; papildomai superplastiklis ir mikrofibra. Mineralinės fazės panašios į CEM II/A-LL: daug C <sub>3</sub> S ir C <sub>2</sub> S, mažesnis C <sub>3</sub> A kiekis
4	Gorkal 40	CAC	3100-3800	~15-25	Kalcio aliuminatinis cementas. Pagrindiniai mineralai: monokalcio aluminatas CA, dikalcio aluminatas CA <sub>2</sub> , gehlenitas C <sub>2</sub> AS, gali būti C <sub>12</sub> A <sub>7</sub> . Beveik nėra silikatinių fazių (C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S). Būdingas labai didelis Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kiekis (~40 %).
5	Stimelit	CEM I 42,5 R	3500-4500	~10-20	Beveik grynas portlandcemenčio klinkeris (~95–100 %) + gipsas. Dominuoja alitas C <sub>3</sub> S (~50–70 %), belitas C <sub>2</sub> S (~15–30 %), mažiau C <sub>3</sub> A ir C <sub>4</sub> AF.

2. Mikrosilika. Naudojama kaip pucolaninis priedas betone ir skiedinių mišiniuose, padidina betono atsparumą gniuždymui, padidina pradinį ir galutinį betono stiprumą, pagerina atsparumą dilimui ir atsparumą smūgiams, sumažina vandens ir garų pralaidumą.
3. Užpildai. Naudotas vidutinio rupumo smėlis, be molio ir organinių priemaišų bei granitinė skalda (frakcija 16mm). Užpildai atitinka LST EN 12620:2003+A1:2008 standartą.

4. Vanduo. Naudojamas miesto vandentiekio vanduo, įvertintas pagal LST 1008:2003. pH: 7.62–7.71, laisvas chloras < 0.05 mg/l, geležis: 34–110 µg/l (gerokai mažiau nei 200 µg/l riba).

Pamatuotas skirtingų betonų slankumas pateikiamas 6 lentelėje.

**6 lentelė.** Betono slankumo matavimo duomenys

Eilės Nr.	Naudotas cementas	Pamatuotas slankumas, cm	Pastabos
1	Schwenk	14	Normalios konsistencijos
2	Kryvyrig	18	Skystokas, vibruojant sluoksniuojasi
3	Rocket M-800	21	Skystokas, vibruojant sluoksniuojasi
4	Gorkal 40	18	Skystokas, vibruojant sluoksniuojasi
5	Stimelit	17	Normalios konsistencijos
6	Stimelit+mikrocilika	16	Normalios konsistencijos

Viso pagaminti 54 bandiniai. Pusė jų patalpinti normalioje aplinkoje, o kita pusė – dėl technologinių procesų susidariusioje agresyvioje aplinkoje ir buvo laikomi 180 dienų. Straipsnyje toliau naudojami bandinių numeriai yra atrinktų reprezentatyvių bandinių numeriai iš bendros 54 kubelių imties.

Analogiškai, kaip ir kernų bandiniams, po 4 ir 6 mėnesių betono kubelių bandiniams buvo atliekamas ultragarsinio impulso greičio bandymas. Bandymų duomenys pateikiami 7 lentelėje.

Iš atliktų bandymų matome, kad normaliomis sąlygomis laikyti kubeliai pasižymėjo didesniu ultragarso greičiu ir mažesne rezultatų sklaida, kas rodo tankią ir vientisą struktūrą.

Agresyvios aplinkos paveikti kubeliai parodė mažesnę greitį ir didesnę sklaidą. Tai rodo struktūros degradaciją dėl mikroįtrūkimų susidarymo, cemento akmens dehidratacijos bei cheminės korozijos.

Tokie bandiniai pasižymi mažesniu stipriu ir didesniu poringumu.

Lyginant pakartotinio bandymo gautus rezultatus su pradiniais, visų bandinių grupėje stebimas aiškus ultragarso sklaidimo laiko padidėjimas (µs) kovo mėn. bandymuose, lyginant su sausio mėn.

Normaliose sąlygose laikyti bandiniai parodė nedidelius pokyčius (~0,8–3,6%), tai rodo kad betonai išlaiko struktūrinį vientisumą, hidratacijos procesai yra stabilūs, galimas net nežymus struktūros tankėjimas, tačiau bendras efektas mažas.

Agresyviomis sąlygomis laikytų kubelių pokyčiai yra žymiai didesni, tai rodo spartesnę mikroįtrūkimų formavimąsi, struktūros pažeidimus dėl aukštos temperatūros ir cheminės korozijos.

Lyginant pirminio ir pakartotinio bandymo rezultatus, labiausiai degradavo betono bandiniai su Gorkal 40. Šie bandiniai buvo laikomi agresyvioje aplinkoje.

Betono bandiniai taip pat buvo mechaniškai sugniuždyti. Gniuždymo duomenys pateikiami 8 lentelėje.

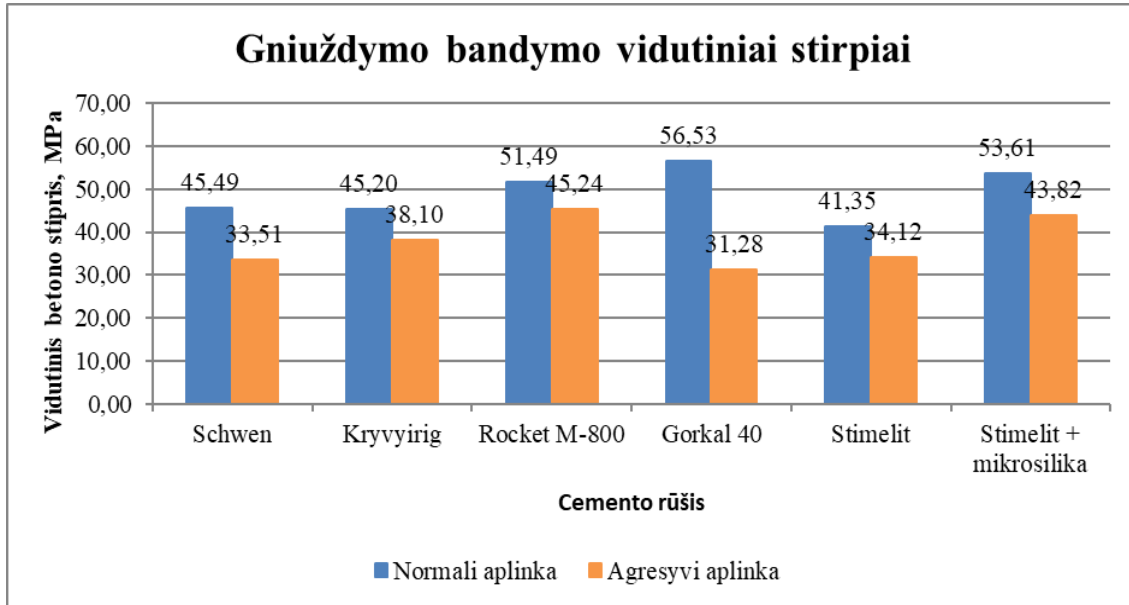
7 lentelė. UPV bandymo duomenys betono bandiniams

Bandinio Nr.	Laikymo sąlygos	Plotis	Ilgis	Aukštis	Masė	Cemento rūšis	Ultragarso sklidimo laikas	Ultragarso greitis	Ultragarso sklidimo laikas	Ultragarso greitis	Vidutinių reikšmių pokytis	
							Po 4 mėnesių		Po 6 mėnesių			
							μs	m/s	μs	m/s		%
2	Normali aplinka	10	10	10	2288	Schwenk	22,2	4504	23,1	4329	2,96	
							22,7	4405	22,7	4405		
							22,6	4424	23,7	4219		
4	Agresyvi aplinka	10	10	10,2	2368		Schwenk	21,8	4587	22,7	4405	3,55
								22,63	4419	23,9	4184	
								25,1	3984	25,4	3937	
8	Normali aplinka	10	10	9,9	2318	Kryvyirig		22,1	4524	22,8	4386	3,25
								23,3	4292	24,2	4132	
								22,3	4484	22,9	4366	
11	Agresyvi aplinka	10	10	9,6	2284		Kryvyirig	23,3	4292	24	4166	3,21
								23,2	4310	23,6	4237	
								22	4545	23,1	4330	
14	Normali aplinka	10	10	9,9	2289	Rocket M-800		21,8	4587	22,9	4366	3,96
								22	4545	23,1	4330	
								21,8	4587	22,2	4504	
16	Agresyvi aplinka	10	10	10	2320		Rocket M-800	22,1	4524	22,5	4444	1,94
								21,8	4587	22,7	4405	
								23,2	4310	23,2	4310	
21	Normali aplinka	10	10	9,5	2325	Gorkal 40		21,8	4587	22,1	4524	0,78
								21,8	4587	21,7	4609	
								20,9	4785	21,2	4717	
23	Agresyvi aplinka	10	10	9,7	2319		Gorkal 40	23,1	4330	23,6	4237	1,44
								23,3	4292	23,6	4237	
								23,2	4310	23,4	4273	
28	Normali aplinka	10	10	10,1	2379	Stimelit		21	4761	22,4	4464	4,48
								21,4	4672	22,2	4504	
								22,3	4484	23	4347	
33	Agresyvi aplinka	10	10	10	2316		Stimelit	22,2	4504	23,7	4319	5,73
								21,8	4587	23	4347	
								22,3	4484	23,4	4273	
45	Normali aplinka	10	10	9,8	2276	Stimelit + mikrosilika		22,6	4424	23,1	4330	1,80
								22,4	4464	22,8	4385	
								21,8	4587	22,1	4524	
49	Agresyvi aplinka	10	10	9,7	2270		Stimelit + mikrosilika	21,7	4609	22,3	4484	4,63
								21,8	4587	22,3	4386	
								21,3	4695	22,7	4405	

8 lentelė. Betono bandinių gniuždymo bandymo rezultatai

Bandinio Nr.	Aplinka, kurioje kietėjo	Plotis, cm	Ilgis, cm	Aukštis, cm	Masė, g	Masė po 180 dienų, g	Cemento rūšis	Gniuždymo jėga, kN	Stipris, MPa
		a	b	h	m <sub>0</sub>	m <sub>1</sub>			
1	Normali	10	10	10	2332	2310	Schwen	454,7	45,47
3	Agresyvi	10	10	10	2329	2247		399,7	39,97
5	Agresyvi	7	7	7	808	788		255,6	52,16
6	Agresyvi	7	7	7	814	789		205,3	41,90
7	Normali	7	7	7	810	783		223	45,51
9	Normali	10	10	9,9	2310	2276	Kryvytirig	380,9	38,47
10		10	10	9,8	2290	2225		373,4	38,10
12	Normali	7	7	6,9	831	820		257,4	53,29
13	Normali	7	7	7	797	775		214,8	43,84
15	Normali	10	10	9,8	2300	2267	Rocket M-800	493	50,31
17	Agresyvi	10	10	9,8	2300	2233		452,4	46,16
18	Normali	7	7	6,5	720	713		239,7	52,68
19	Agresyvi	7	7	7	799	783		217,2	44,33
20	Normali	10	10	9,8	2340	2322	Gorkal 40	607,7	62,01
22	Normali	10	10	9,9	2371	2313		296,3	29,93
24	Normali	7	7	7	821	812		359,8	73,43
25	Normali	7	7	6,8	807			162,6	34,16
26	Normali	7	7	7	839	814		159,9	32,63
27	Normali	10	10	9,8	2325	2308	Stimelit	523	53,37
29	Normali	10	10	9,9	2317	2297		497,5	50,25
30	Normali	10	10	9,9	2309	2294		507,3	51,24
31	Agresyvi	10	10	10	2352	2305		451,6	45,16
32	Agresyvi	10	10	9,7	2255	2201		401,2	41,36
34	Agresyvi	10	10	10	2371	2330		409,4	40,94
35	Normali	7	7	6	720	708		181,2	43,14
38	Normali	7	7	5	565	545		181,6	51,89
42	Normali	10	10	10	2350	2329	Stimelit + mikrosilika	522,9	52,29
43	Normali	10	10	9,9	2330			552,7	55,83
44	Normali	10	10	9,9	2332	2309		521,7	52,70
46	Agresyvi	10	10	9,9	2318	2255		427,1	43,14
47	Agresyvi	10	10	10	2360	2309		477,8	47,78
48	Agresyvi	10	10	9,9	2328	2273		401,2	40,53

Apskaičiuoti vidutiniai betono bandinių gniuždymo stipriai pavaizduoti grafike (3 paveikslėlis).



3 Pav. Gniuždymo bandymo vidutiniai stipriai

Atlikus betono bandinių gniuždymo rezultatų analizę, apskaičiuota, kiek agresyvioje aplinkoje laikyti bandiniai vidutiniškai silpnesni už normaliomis sąlygomis laikytų bandinių. Palyginimas pateikiamas 9 lentelėje. Pagal lentelės duomenis matoma, kad mažiausias skirtumas tarp agresyvioje ir normalioje aplinkoje laikytų bandinių stiprio gniuždant verčių priklauso bandiniams, pagamintiems su Rocket M-800 cementu, kuris pasižymi didžiausių dalelių smulkumu tarp naudotų cementų ir mažesniu  $C_3A$  kiekiu. Be to jo mineralinėje sudėtyje neaptiktas mineralas  $C_4AF$ . Bandiniai su kalcio aluminatiniu Gorkal 40 cementu parode didžiausia stiprio praradimą tarp ištirtų cementų. Aluminatinis cementas yra žinomas dėl savo didelio atsparumo įvairioms cheminėms agresyvioms aplinkoms, įskaitant ir sulfatus. Aluminatinis cementas yra atsparesnis už įprastą cementą, tačiau stipriai rūgštinėje aplinkoje (kurioje gali dalyvauti amoniako junginiai o ypač rūgštis) vyks cheminė reakcija, sukelianti cemento koroziją. Acto rūgštis yra silpna rūgštis, tačiau ji pakankamai stipri, kad reaguotų su cemento sudėtyje esančiais kalcio aluminatais ir sukeltų koroziją. Rūgštis tirpina cemento rišamąją medžiagą, paversdama ją tirpiomis kalcio ir aliuminio acetato druskomis. Tai susilpnina cemento struktūrą. Turint omenyje kad aluminatinio cemento sudėtyje yra didelis kiekis kalcio aluminatu, galima daryti išvadą, kad tokio cemento negalima naudoti patalpose kur gali būti kontaktas su rūgštimis. Portlancemenčiai, kuriuose yra mažiau aliuminio kiekio, t.y  $C_3A$  ir  $C_4AF$  gali būti labiau tinkami tokioje aplinkoje.

9 lentelė. Betono bandinių, laikytų normalioje ir agresyvioje aplinkoje, vidutinių stiprių skirtumas procentine išraiška

Eilės Nr.	Cemento rūšis	Skirtumas, %
1	Schwenk	26,3
2	Kryvyirig	15,7
3	Rocket M-800	12,1
4	Gorkal 40	44,7
5	Stimelit	17,5
6	Stimelit+mikrocilika	18,3

### Išvados ir rekomendacijos

Atlikus konstrukcijos kernų ir betono kubelių bandymus, galima daryti išvadas:

- Betono bandinių tūrinis svoris turi stiprią koreliaciją su ultragarsinio impulso bangos greičiu – kuo tankis didesnis, tuo ir bangos greitis didesnis;
- Tarp betono stiprio, nustatyto gniuždant ir tankio ar ultragarsinio impulso bangos greičio koreliacija yra silpnesnė, bet ji reikšminga;
- Stiprio matavimai Šmidt plaktuku visiškai nekoreliuoja su rezultatais, gautais gniuždant bandinius.
- Bandant betono kubelius, didžiausia betono degradacija stebima betono kubeliuose, pagamintuose naudojant Gorkal 40 cementą, o geriausiai išsilaikė betono kubeliai, kurie pagaminti naudojant Rocket M-800 cementą.

Rekomendacijos:

- Ultragarsinio impulso bangos bandymas yra tinkamas metodas preliminariai betono būklei nustatyti neardomuoju būdu.
- Bandymo sklerometru visiškai neatspindi betono tikrosios būklės. Atšokimo koeficientas leidžia nustatyti tik betono viršutinio sluoksnio sukietėjimą, tačiau nefiksuoja gilesnių betono sluoksnių degradacijos.
- Konstrukcijų, eksploatuojamų agresyvioje aplinkoje, gamybai iš tyrinėtų cementų labiausiai tinka Rocket M-800 cementas. Rekomenduojama vengti aluminatinio cemento naudojimo agresyvioje aplinkoje.

Iš tyrimų matome, kad agresyvios aplinkos poveikis konstrukcijoms reikšmingas, tada siekiant konstrukcijų ilgaamžiškumo, vertinga šalinti iš aplinkos agresyvius junginius, naudojant inovatyvias sistemas. Projektuojant konstrukcijas agresyvioje aplinkoje būtina naudoti cementus, kurie mažiau veikiami agresyvios aplinkos.

### **Literatūros sąrašas**

1. Aging concrete structures: a review of mechanics and concepts. Roman Wan-Wendner
2. Sulfate attack performance of concrete mixtures with use of copper slag as supplementary cementitious material, Yimmy Fernando Silva, Claudia Burbano-Garcia, Gerardo Araya-Letelier, Silvia Izquierdo, 2025
3. Triaxial test on concrete material containing accelerators under physical sulphate attack. Luo Wei, Jin Xiao-Guang, Zhang Zhong, 2018;
4. Sulphate and acid resistance of HVFA concrete incorporating nano silica Charith Herath, David W. Law Chamila Gunasekara, Sujeeva.
5. A Study of Deterioration of Structural Concrete Made with High-Alumina Cement. A. M. Neville, 1963;
6. Destructive and Non-destructive Testing of Concrete Structures M. Jedidi, M. Kaouther, 2014
7. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 206:2013+A2:2021. Betonai. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis.
8. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12620:2003+A1:2008. Betono užpildai.
9. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 932-1:2001. Užpildų pagrindinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Ėminio ėmimo metodai.
10. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 197-1:2011. Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai.

11. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST 1008:2003. Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant grąžinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti.
12. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 933-1:2012. Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas.
13. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-1:2021. Sukietėjusio betono bandymai. 1 dalis. Pavidalas, matmenys ir kiti bandinių bei liejimo formų reikalavimai.
14. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-2:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 2 dalis. Bandinių pagaminimas ir kietinimas stipriui nustatyti.
15. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12350-6:2019. Betono mišinio bandymai. 6 dalis. Tankis.
16. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-3:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris.
17. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12504-2:2012], Betono bandymas konstrukcijose. 2 dalis. Neardomieji bandymai. Atšokimo rodiklio nustatymas.
18. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 206-1:2002], Betonai. 1 dalis. Techniniai reikalavimai, savybės, gamyba ir atitiktis.

## **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF TIME AND ENVIRONMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE METHODS**

**Vaida Lendraitienė, Ina Pundienė**

Designing reinforced concrete structures, especially those operating in aggressive environments, requires careful selection of concrete composition to ensure durability and long-term mechanical performance. Aggressive environmental factors such as chemical compounds, high or low temperatures, and elevated humidity can cause both physical and chemical corrosion of concrete, leading to a reduction in strength and modulus of elasticity. These changes are irreversible, making preventive design strategies essential.

This study investigates the condition of a prefabricated reinforced concrete industrial building constructed in 1972, where intensive production processes occur. The structure operates under harsh conditions, including elevated temperatures (40–60 °C), exposure to steam reaching 180 °C, and significant volumes of warm wastewater. Evaporation from open drainage channels releases aggressive chemical compounds, including hydrogen sulfide, ammonia, and organic acids, creating a highly corrosive environment.

Experimental results show a strong correlation between concrete density and ultrasonic pulse velocity, indicating that ultrasonic testing is suitable for preliminary non-destructive evaluation of structural condition. In contrast, Schmidt hammer measurements do not reliably reflect actual concrete condition, as they only capture surface properties. A weaker but statistically significant relationship was found between compressive strength and both density and ultrasonic measurements.

Comparative analysis of different cement types revealed that concrete made with Gorkal 40 (aluminate cement) exhibited the highest level of degradation, while concrete produced with Rocket M-800 cement demonstrated the best durability. Therefore, the use of aluminate cement in aggressive environments is not recommended, and more resistant alternatives should be preferred.

The findings highlight that ensuring long-term performance of reinforced concrete structures requires not only careful material selection but also mitigation of aggressive environmental effects through technological solutions, such as improved ventilation and pollutant control systems.

**Keywords:** Reinforced concrete durability, Aggressive environment, Concrete corrosion, Cement type selection, Non-destructive testing